

## EVALUACIÓN DE PÉRDIDAS DE AGUA Y PARÁMETROS HIDRÁULICOS MEDIANTE ENSAYOS DE INFILTRACIÓN EN CAMPO

*Using infiltration tests to evaluate water losses and hydraulic parameters in field works*

Silvino Castaño, Luis Moreno, Almudena de la Losa, Héctor Aguilera, María Emilia Jiménez, Rosa Mediavilla (\*)

### RESUMEN

*Se propone la realización de un taller sobre herramientas y métodos de caracterización y estudio "in situ" de la zona no saturada, medio en el que se producen procesos de evapotranspiración y por el que circulan las aguas de recarga hacia el nivel freático. Se centrará en una metodología basada en ensayos de infiltración que permite considerar todas las etapas de caracterización del medio no saturado en campo, y cuya aplicación última sería la obtención de modelos conceptuales de funcionamiento del flujo de agua y transporte de solutos.*

### ABSTRACT

*A workshop about field methods and tools used in unsaturated zone studies is proposed. It is focused on a methodology based on infiltration measurements in cylinder infiltrometers, but involving every necessary step to characterize the unsaturated zone in field works. The ultimate goal of this methodology is to achieve conceptual models of water flow and solute transport in the unsaturated zone.*

**Palabras clave:** Infiltración, métodos de campo, zona no saturada

**Keywords:** Field methods, infiltration, unsaturated zone

### INTRODUCCIÓN

Prácticamente hasta principios del siglo XIX no se completó el modelo conceptual del ciclo hidrológico que rige en la actualidad, y que comenzó a justificarse entre el Renacimiento y la Ilustración con la medida instrumental y científica de algunos de sus componentes (Solís, 1990).

El paso de la fase atmosférica a la terrestre del ciclo hídrico es, desde el punto de vista humano, una de las etapas más importantes. En ese paso, el agua de la precipitación se transforma en escorrentía, susceptible de ser aprovechada directamente, o en evapotranspiración, que, en cultivos o en bosques, puede ser aprovechada por el hombre indirectamente, por medio de la vegetación.

La transformación de la precipitación en escorrentía es difícil de determinar por la cantidad de factores que intervienen (evapotranspiración, dinámica en medio no saturado), muchos de ellos dependientes de la escala de trabajo. Esa dificultad queda reflejada en la estimación de la recarga a los acuíferos, que es uno de los procesos más difíciles de comprender por gran parte de no especialistas (Bach y Brusi, 1988), y presenta también las mayores incertidumbres en cualquier balance hídrico subterráneo, existiendo para su cálculo numerosos métodos (Scanlon et al., 2002).

Sin embargo, se han desarrollado diferentes métodos de campo para intentar comprender y cuantificar el comportamiento del agua que cae sobre el terreno y atraviesa la parte superior del mismo, condicionado por las características hidráulicas del medio no saturado por el que circula el agua.

Los métodos de campo para medida directa de agua por infiltración tienen la desventaja de representar sólo una pequeña porción de terreno respecto a la superficie total, y de basarse en el comportamiento de una superficie encharcada. Tienen la ventaja de que se puede realizar un número considerable, por lo que se pueden aplicar métodos geoestadísticos y sirven para preparar y calibrar modelos matemáticos. Hay pues que comparar y complementar resultados obtenidos por distintos métodos (campo, laboratorio, modelización). La comparación de resultados obtenidos por diversos métodos ha sido objeto de múltiples trabajos, entre otros los de Reynolds et al. (2000), Muñoz-Carpena et al. (2002) o Herman et al. (2003).

Entre los métodos más utilizados para estudiar el comportamiento del agua desde que cae a tierra hasta pasar a la zona saturada se pueden mencionar los lisímetros y los infiltrómetros de anillo. Los lisímetros son instalaciones en las que se aísla una porción del terreno y se experimenta sobre él bajo diferentes condiciones hídricas y biológicas. Este tema ya fue tratado, desde el punto de vista de la didáctica del ciclo del agua por Bach y Brusi (1988).

(\*)Departamento de Investigación y Prospectiva Geocientífica. Instituto Geológico y Minero de España. C/Ríos Rosas, 23. 28003-Madrid. e-mails: s.castano@igme.es, l.moreno@igme.es, a.delalosa@igme.es, h.aguilera@igme.es, e.jimenez@igme.es, r.medivilla@igme.es.



Fig. 1. Infiltrómetros de doble anillo y anillo único

En cuanto a los infiltrómetros de anillo, el método se basa esencialmente en la medida de la pérdida de agua a partir de una fuente (en este caso un cilindro relleno de agua) con el tiempo. Permite estimar determinadas propiedades hidráulicas en condiciones saturadas o próximas a la saturación (Youngs, 1991), especialmente la conductividad hidráulica vertical, a partir de la velocidad de infiltración, cuando la cantidad de agua que se infiltra por unidad de tiempo permanece prácticamente constante.

Han sido utilizados tradicionalmente en el campo de la agronomía, a veces para comprender la evolución de las aguas de riego, pero su uso está muy extendido en todas las áreas del conocimiento relacionadas con el flujo del agua en el medio no saturado, siendo de interés la historia, el comportamiento actual y la evolución hidroquímica de las zonas de recarga.

El taller que se propone consiste en la realización de ensayos de infiltración en campo, centrándose en la técnica de los infiltrómetros de anillo. Dado que, como se ha comentado, esta técnica está muy extendida, es posible encontrar fácilmente referencias a las formas de realización y representación de resultados (ver por ejemplo <http://www.globe.gov/sda/tg97es/suelos/Infiltracion.html> o Cox, 2006). Sin embargo los ensayos de infiltración se integrarán en un cuerpo metodológico que permite hacer una revisión del material, etapas y las técnicas complementarias necesarias para la caracterización completa del medio no saturado. Los principios de esta metodología pueden encontrarse en Moreno (2003)

Con la realización del taller en la Finca “El Encín” del Instituto Madrileño de Investigación y Desarrollo Rural, Agrario y Alimentario (IMIDRA) se puede mostrar el gran valor práctico de este tipo de métodos.

### Infiltrómetros de anillo

Como se ha mencionado, es un método tradicional para realizar ensayos de infiltración en campo y, por tanto, estimar la conductividad hidráulica del terreno. El ensayo más sencillo consiste en introdu-

cir una determinada cantidad de agua en un cilindro metálico y medir en el tiempo la cantidad de agua que se pierde por infiltración. Ese caudal tiende a disminuir con el tiempo, cuando el medio tiende a la saturación, y se puede relacionar con la conductividad hidráulica saturada del material.

Existen dos tipos de infiltrómetros de anillo o cilindro (Fig. 1), el doble anillo (con el que se intenta eliminar el efecto de la expansión lateral del bulbo de humedecimiento bajo el anillo central) y el anillo único. Las variedades de ensayos en estos infiltrómetros son múltiples, destacando los grupos de ensayos a carga constante (manteniendo el nivel del agua en el anillo), y los más utilizados de ensayos a carga variable. En Bouwer (1986) y Youngs (1991) se describen el uso, aplicaciones y resultados que se pueden obtener de estos tipos de infiltrómetros.

Las dimensiones de la mayor parte de esos aparatos (decenas de cm de diámetro) implican que el papel de la estructura del terreno en el proceso de infiltración en situaciones próximas a la saturación sea muy significativo, pero quizá, por ello, representan una escala intermedia adecuada entre el medio real y las pequeñas muestras analizadas en laboratorio.

Las dimensiones del ensayo también le hacen adecuada para combinarlo con otras técnicas (caracterización hidráulica de las muestras de terreno en laboratorio, ensayos de trazadores, infiltrometría, modelización matemática), mediante una metodología que se ha denominado *ensayo de infiltración controlada*. Este ensayo, el planteado para el taller, permite, por tanto, conocer técnicas y herramientas de campo para el estudio de la zona no saturada.

### Ensayo de infiltración controlada

Se trata de ensayos hidráulicos de infiltración, a carga variable y a carga constante, con o sin inyección de trazador. Tiene su principal aplicación en la elaboración de modelos matemáticos de flujo y transporte en el suelo y el resto de la zona no saturada, a los que proporciona datos básicos como son las conductividades hidráulicas, una visión de la heterogeneidad del punto de ensayo, dispersividades, etc.

Este tipo de ensayo sirve además como punto de referencia en la calibración de modelos matemáticos.

En esencia, la técnica consiste en la inyección de agua, a carga constante o variable, en el suelo en estudio (mediante la técnica de infiltrómetro de anillo único), su posterior muestreo, análisis e interpretación de resultados. Para ello es necesario tomar muestras inalteradas para conocer las propiedades hidráulicas, conocer el estado del suelo antes de realizar el ensayo (perfil de humedad y concentraciones en el tiempo inicial), preparar un ensayo de trazador al mismo tiempo que se realiza la infiltración, controlar la evolución vertical y horizontal del bulbo de humectación durante el ensayo, y tomar muestras a distintas profundidades y distancias del centro del ensayo una vez finalizado éste.

### Procedimiento operativo para la realización de un Ensayo de Infiltración Controlada

Como cualquier trabajo realizado en campo en condiciones reales, está sujeto a numerosos imprevistos que pueden alterar su desarrollo e incluso impedir su realización, sin embargo, una correcta planificación evitará la mayor parte de los posibles inconvenientes.

La secuencia de operaciones se resume los siguientes pasos:

#### 1) Comprobación del equipo de campo

Es necesario comprobar que se dispone de todo el material necesario, que se encuentra en condiciones operativas y que se dispone de los repuestos necesarios para solucionar *in situ* cualquier contingencia que pudiera surgir.

En la tablas 1 y 2 se presentan sendas listas del material necesario para la localización del ensayo y para la realización de un ensayo estándar (una inyección a carga constante y una inyección a carga variable).

| Item nº | Descripción         | Nº de unidades | OK |
|---------|---------------------|----------------|----|
| 1       | Mapa                | 1              |    |
| 2       | GPS                 | 1              |    |
| 3       | Cuaderno de campo   | 1              |    |
| 4       | Bolígrafo           | 2              |    |
| 5       | Rotulador indeleble | 2              |    |

Tabla 1. Material general de campo

#### 2) Preparación de las soluciones de trazado/inyección

Para preparar la solución de inyección/trazado es necesario asegurarse del aprovisionamiento de agua en la zona en estudio. Si no se dispone de agua cerca del punto de ensayo, habrá que llevarla desde la base.

La disolución trazadora se prepara inicialmente en forma de disolución madre concentrada, añadiendo una bolsita de los productos ya pesados en un bidón con 5l, es importante asegurar la perfecta dilución de todo el contenido de la bolsa. Esta operación puede llevarse a cabo el día previo al ensayo.

Los agentes empleados como trazadores se deben seleccionar en base a los objetivos del estudio. En muchos casos el balance de especies nitrogenadas es significativo en la evolución del medio (zonas agrícolas, vertederos de residuos sólidos urbanos, filtros verdes). Por ello se pueden seleccionar los trazadores que aparecen en la tabla 3. La tabla 4 puede utilizarse como ejemplo para el seguimiento de las concentraciones de los compuestos de la solución.

| Item | Descripción  | Nº de unidades |             | OK |
|------|--|----------------|-------------|----|
|      |  | 1 cilindro     | 2 cilindros |    |
| 1    | Regleta medida nivel                               | 1              | 1           |    |
| 2    | Embudo relleno agua                                | 1              | 1           |    |
| 3    | Bolsas trazador polivalente (para 5 L, 8x)         | 8              | 8           |    |
| 4    | Bidón de plástico de 10 L, preparación 5x          | 8              | 8           |    |
| 5    | Bidón de plástico de 50 L, premezcla               | 1              | 1           |    |
| 6    | Manguera para trasvase                             | 1              | 1           |    |
| 7    | Cilindro metálico infiltración                     | 1              | 2           |    |
| 8    | Equipo montaje cilindro infiltración (tapa y mazo) | 1              | 1           |    |
| 9    | Cinta métrica                                      | 1              | 1           |    |
| 10   | Cronometro   | 1              | 1           |    |
| 11   | Sonda perforación 2 metros                         | 1              | 1           |    |
| 12   | Cilindros metálicos (50 mm $\phi$ )                | 1              | 1           |    |
| 13   | Kit de pala, piqueta y espátula                    | 1              | 1           |    |
| 14   | Bolsas muestra suelo                               | 1              | 1           |    |
| 15   | Botellas de plástico 0,5 L                         | 250            | 300         |    |
| 16   | Rollo de cinta americana                           | 6              | 6           |    |
| 17   | Lámina de plástico de 2 x 2 m                      | 2              | 3           |    |
| 18   | Termómetro   | 1              | 1           |    |
| 19   | Evaporímetro                                       | 1              | 1           |    |

Tabla 2. Material necesario para el ensayo de inyección (dos ensayos simultáneos)



| Nombre           | Fórmula química  | Solubilidad en agua g/100 g H <sub>2</sub> O | Pm (uma) | Límite de detección (mg/l) | Masa en la solución de inyección (mg/l) |
|------------------|--|--|----------|----------------------------|---|
| Nitrato potásico | KNO <sub>3</sub>   | 38   | 101,1    |                            |   |
| Nitrato amónico  | NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>                                    | 208  | 80,1     |                            |   |
| Ácido bórico     | H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>                                     | 5,7  | 61,8     |                            |   |
| Fosfato cálcico  | Ca(H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·H <sub>2</sub> O | 2  | 252      |                            |   |
| Cloruro sódico   | NaCl   | 36   | 58,4     |                            |   |

Tabla 3.- Ejemplos de trazadores empleados en los ensayos de inyección

| Especies trazada | Fórmula química               | Concentración en la solución a inyectar |  |  |  |
|------------------|-------------------------------|---|--|--|--|
| Nitrato          | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  |   |  |  |  |
| Amonio           | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>  |   |  |  |  |
| Borato           | BO <sub>3</sub>               |   |  |  |  |
| Potasio          | K <sup>+</sup>                |   |  |  |  |
| Fósforo          | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> |   |  |  |  |
| Cloruro          | Cl <sup>-</sup>               |   |  |  |  |

Tabla 4.- Concentración en la solución trazadora

### 3) Localización y selección del punto de ensayo

Una vez en la zona de trabajo habrá que seleccionar el punto en el cual realizar el ensayo. El punto elegido debe ser representativo del proceso y de la zona que se quiere estudiar, debe ser accesible con el equipo, debe permitir la instalación del anillo de infiltración (terrenos pedregosos o con abundancia de raíces gruesas no son adecuados para este tipo de ensayos), no deben existir zonas de infiltración incontrolada (como grietas) y debe permitir la instalación del cilindro metálico de forma que no haya escapes de agua por los laterales y penetre lo suficiente en el terreno (unos 5cm). Esta última condición y con la necesidad de poder tomar las

muestras de suelo con una barrena manual son la mayor limitación de la técnica descrita

### 4) Toma de muestras

Es necesario tomar muestras de terreno para caracterizarlo antes y después del ensayo, con el fin de caracterizar el medio hidráulicamente y establecer las condiciones iniciales de humedad/tensión y el fondo de los trazadores.

Para caracterizar en laboratorio las algunas propiedades del material es necesaria la toma de muestras inalteradas mediante cilindros calibrados (Fig. 2). A partir de las muestras tomadas de esta forma se puede medir la densidad aparente (masa de material



Fig. 2. Toma de muestras de terreno para caracterización del medio. Izda., muestras alteradas; dcha., muestras inalteradas.

sólido frente al volumen de terreno que ocupa), la porosidad (volumen de huecos frente a volumen de terreno), la conductividad hidráulica o establecer la curva de retención (relación entre la tensión del agua en el terreno y la humedad en el mismo). En la tabla 5 se muestra el ejemplo de un estadillo para la toma de muestras de caracterización hidráulica.

Para establecer los perfiles iniciales de humedad, el fondo de trazadores o las muestras granulométricas no es preciso de las muestras estén inalteradas, por lo que es suficiente utilizar cualquier tomamuestras manual que se adapte al tipo de terreno (Fig. 2). La tabla 6 corresponde un estadillo de toma de muestras para la realización de perfiles de humedad y extractos solubles.

#### 5) Montaje de los cilindros de inyección

El anillo de infiltración suele ser un cilindro de acero de dimensiones variables. Los propuestos tienen 33cm de diámetro, 40cm de altura y 2mm de espesor, biselado en uno de sus extremos para poder penetrar mejor en el suelo. Estas dimensiones pueden, sin embargo, provocar problemas de transporte, especialmente si se necesita además transportar el agua del ensayo.

El cilindro debe quedar introducido en el terreno al menos 5cm, y además, ha de quedar lo mejor nivelado posible. Para ello se utiliza una tapa metálica que permite su clavado en el suelo con más comodidad, empleándose una maza pesada que no rebote.

El cilindro estará bien instalado si no presenta ninguna fuga de agua por su lateral a lo largo de la experiencia. No se debe manipular el terreno que queda en el interior del perímetro del cilindro pero se puede compactar por fuera, o incluso formar una barrera con algo de material de la zona.

#### 6) Desarrollo de la inyección

La inyección comienza con el llenado del cilindro y la medida del nivel del agua en el mismo (Fig. 3). A determinados tiempos se debe medir la altura de la lámina de agua en el cilindro. Si el ensayo se realiza a nivel constante se mide el tiempo necesario para el descenso originado por una determinada cantidad de agua (p.e. 1cm).



Fig. 3. Ensayo de infiltración realizado en un nivel inferior a la superficie del terreno, con regla para la medida de la variación del nivel del agua.

Es conveniente, de manera simultánea al ensayo, monitorizar la temperatura atmosférica, la del terreno y medir la evaporación en lámina libre mediante un evaporímetro (puede ser importante si la temperatura es elevada o el ensayo se alarga en el tiempo).

En todo momento se debe vigilar la aparición de fugas de agua, que como se ha explicado, harían necesario desmontar el equipo y volver a iniciar el ensayo en otro punto.

#### 7) Toma de muestras

Una vez finalizada la inyección se deben tomar muestras de terreno, al menos en el centro del cilindro, para realizar un perfil de humedad y contenido en las especies del trazador, si es posible hasta 150cm de profundidad, con muestras cada 10cm. Es conveniente tomar muestras en dos planos perpendiculares en los límites del cilindro y fuera de ellos, a distintas profundidades.

Si se va a realizar posteriormente una modelización es muy importante conocer el tiempo transcurrido desde el comienzo o finalización del ensayo hasta que se recogen las muestras, recomendándose un período de 24 horas desde que dejó de haber agua en el cilindro, o desde que se dejó de realizar el ensayo.

En la tabla 6 se muestra el estadillo correspondiente a la recogida de muestras para la realización de los perfiles de humedad y extractos solubles finales.

#### 8) Preparación y envío al laboratorio

Una vez realizado el ensayo, es necesario enviar las muestras recogidas al laboratorio, siguiendo las especificaciones propias de cada tipo de muestra (líquida, sólida alterada, sólida no alterada, etc.). Como recordatorio, las muestras recogidas son:

- Muestra de la disolución trazadora.
- Perfil y catas, en las proximidades del punto elegido para la inyección, antes de iniciar el ensayo para obtener la humedad y los solutos del extracto del suelo a tiempo cero.
- Muestras no alteradas en cilindros metálicos de 100 cm<sup>3</sup>, cada capa identificada en el perfil que se protegen frente a la evaporación mediante la colocación de una tapa y/o un envoltorio de plástico, tomando réplicas, para las siguientes determinaciones en laboratorio: Conductividad hidráulica (mínimo 3 réplicas para cada orientación), caja de arena/caolín (3 a 6 réplicas) y densidad aparente (3 réplicas).
- También para cada capa identificada se deben tomar 2 muestras de unos 100g, en bolsa de plástico con cierre hermético, determinar textura y contenido en materia orgánica y en carbonatos. Con esta muestra además se calcula la humedad en situación de alta tensión, es deseable alterar la muestra lo menos posible, y transportarla evitando que sufra compresiones ni deformaciones.
- Muestras de 7 catas en un plano XY perpendicular a la superficie del terreno (y en otro plano XY opcional, en caso de observarse anisotropía en el terreno), extrayendo, mediante un taladro manual de muestreo, una muestra cada 10cm de profundidad, para determinar humedad y solutos del extracto del suelo al final del ensayo.

| Descripción muestra                       | Punto de muestreo  | Cantidad aproximada | Contenedor | Nº réplicas | Identificador | Comentarios |
|---|--------------------|---------------------|------------|-------------|---------------|-------------|
| Disolución trazadora                      | Bidón de premezcla | 0,5 L               | Botella    | 1           |               |             |
|   | Capa 1, H          | 100 cm <sup>3</sup> | Cilindro   | ≥ 3         |               |             |
|   | Capa 1, V          | 100 cm <sup>3</sup> | Cilindro   | ≥ 3         |               |             |
|   | Capa 2, H          | 100 cm <sup>3</sup> | Cilindro   | ≥ 3         |               |             |
| SUELO para:<br>permeámetro de laboratorio | Capa 2, V          | 100 cm <sup>3</sup> | Cilindro   | ≥ 3         |               |             |
|   | Capa 3, H          | 100 cm <sup>3</sup> | Cilindro   | ≥ 3         |               |             |
|   | Capa 3, V          | 100 cm <sup>3</sup> | Cilindro   | ≥ 3         |               |             |
|   | Capa 4, H          | 100 cm <sup>3</sup> | Cilindro   | ≥ 3         |               |             |
|   | Capa 4, V          | 100 cm <sup>3</sup> | Cilindro   | ≥ 3         |               |             |
|   | Capa 1             | 100 cm <sup>3</sup> | Cilindro   | 3 a 6       |               |             |
|   | Capa 2             | 100 cm <sup>3</sup> | Cilindro   | 3 a 6       |               |             |
|   | Capa 3             | 100 cm <sup>3</sup> | Cilindro   | 3 a 6       |               |             |
| SUELO para:<br>arena/caolín               | Capa 4             | 100 cm <sup>3</sup> | Cilindro   | 3 a 6       |               |             |
|   | Capa 1             | 100 cm <sup>3</sup> | Cilindro   | 3           |               |             |
|   | Capa 2             | 100 cm <sup>3</sup> | Cilindro   | 3           |               |             |
|   | Capa 3             | 100 cm <sup>3</sup> | Cilindro   | 3           |               |             |
| SUELO para:<br>densidad aparente          | Capa 4             | 100 cm <sup>3</sup> | Cilindro   | 3           |               |             |
|   | Capa 1             | 100 g               | Bolsa      | 1           |               |             |
|   | Capa 2             | 100 g               | Bolsa      | 1           |               |             |
|   | Capa 3             | 100 g               | Bolsa      | 1           |               |             |
| SUELO para:<br>pF, cámara de Richards     | Capa 4             | 100 g               | Bolsa      | 1           |               |             |
|   | Capa 1             | 100 g               | Bolsa      | 1           |               |             |
|   | Capa 2             | 100 g               | Bolsa      | 1           |               |             |
|   | Capa 3             | 100 g               | Bolsa      | 1           |               |             |
| SUELO para:<br>textura<br>MO y carbonatos | Capa 4             | 100 g               | Bolsa      | 1           |               |             |
|   | Capa 1             | 100 g               | Bolsa      | 1           |               |             |
|   | Capa 2             | 100 g               | Bolsa      | 1           |               |             |
|   | Capa 3             | 100 g               | Bolsa      | 1           |               |             |
|   | Capa 4             | 100 g               | Bolsa      | 1           |               |             |
|   |                    |                     |            |             |               |             |

Tabla 5. Estadillo para la toma de muestras de caracterización hidráulica

| <b>Descripción:</b>                           | <b>Muestras de SUELO para determinar la humedad y los solutos del extracto</b> |      |       |       |       |       |       |       |       |       |        |         |         |         |         |
|---|--|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|---------|---------|---------|---------|
| Cata antes de la inyección                    | Identificación:  |      |       |       |       |       |       |       |       |       |        |         |         |         |         |
|   | Posición:  |      |       |       |       |       |       |       |       |       |        |         |         |         |         |
|   | Profundidad (cm):  | 0-10 | 10-20 | 20-30 | 30-40 | 40-50 | 50-60 | 60-70 | 70-80 | 80-90 | 90-100 | 100-110 | 110-120 | 120-130 | 130-140 |
|   |  |      |       |       |       |       |       |       |       |       |        |         |         |         |         |
|   | Comentarios  |      |       |       |       |       |       |       |       |       |        |         |         |         |         |
| Cata 1 de X, al final del ensayo de inyección | Identificación:  |      |       |       |       |       |       |       |       |       |        |         |         |         |         |
|   | Posición:  |      |       |       |       |       |       |       |       |       |        |         |         |         |         |
|   | Profundidad (cm):  | 0-10 | 10-20 | 20-30 | 30-40 | 40-50 | 50-60 | 60-70 | 70-80 | 80-90 | 90-100 |         |         |         |         |
|   |  |      |       |       |       |       |       |       |       |       |        |         |         |         |         |
|   | Comentarios  |      |       |       |       |       |       |       |       |       |        |         |         |         |         |
| Cata 2 de X, al final del ensayo de inyección | Identificación:  |      |       |       |       |       |       |       |       |       |        |         |         |         |         |
|   | Posición:  |      |       |       |       |       |       |       |       |       |        |         |         |         |         |
|   | Profundidad (cm):  | 0-10 | 10-20 | 20-30 | 30-40 | 40-50 | 50-60 | 60-70 | 70-80 | 80-90 | 90-100 |         |         |         |         |
|   |  |      |       |       |       |       |       |       |       |       |        |         |         |         |         |
|   | Comentarios  |      |       |       |       |       |       |       |       |       |        |         |         |         |         |
| Cata 3 de X, al final del ensayo de inyección | Identificación:  |      |       |       |       |       |       |       |       |       |        |         |         |         |         |
|   | Posición:  |      |       |       |       |       |       |       |       |       |        |         |         |         |         |
|   | Profundidad (cm):  | 0-10 | 10-20 | 20-30 | 30-40 | 40-50 | 50-60 | 60-70 | 70-80 | 80-90 | 90-100 |         |         |         |         |
|   |  |      |       |       |       |       |       |       |       |       |        |         |         |         |         |
|   | Comentarios  |      |       |       |       |       |       |       |       |       |        |         |         |         |         |

Tabla 6. Estadillo para la toma de muestras para humedad y extracto soluble

## AGRADECIMIENTOS

La utilización y puesta a punto de parte del instrumental y la metodología utilizadas en el taller se ha llevado a cabo gracias a los proyectos CGL2005-06458-C02-01/HID y CGL2006-13915/CLI del Ministerio de Educación y Ciencia, y a la colaboración del Instituto Madrileño de Investigación y Desarrollo Rural, Agrario y Alimentario y el Departamento de Edafología de la Facultad de Farmacia de la Universidad Complutense de Madrid.

## BIBLIOGRAFÍA

- Bach, J.; Brusi, D. (1988). Reflexiones y recursos sobre la didáctica del ciclo del agua. *Henares, Rev. Geol.*, 2, 223-232.
- Bouwer, H. (1986): Intake rate: Cylinder infiltrometer, in *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods. Agronomy Monograph no. 9. (2nd Edition)*. American Society of Agronomy-Soil Science Society of America. Madison. Pág. 825-844
- Cox, C. (2006): *Determinación hidráulica de la zona no saturada con el infiltómetro de anillo*. Dpto. de Ingeniería Civil. Universidad de Chile. 11pp. ([http://mct.dgf.uchile.cl/AREAS/Hidro\\_MOD3/Guia%20Estudiantes%20Infiltr%F3metro.pdf](http://mct.dgf.uchile.cl/AREAS/Hidro_MOD3/Guia%20Estudiantes%20Infiltr%F3metro.pdf), en 2008)
- Herman, S., Mertens, J., Timmerman, A.; Feyen, J. (2003). Comparison of tension infiltrometer, single-ring pressure infiltrometer and soil core Ksat estimates on a sandy loam hill slope. *Geophysical Research Abstracts*, vol. 5, 02662, 2003
- Moreno, L., Ed. (2003): *La depuración de aguas residuales urbanas de pequeñas poblaciones mediante infiltración directa en el terreno*. Serie: Hidrogeología y Aguas Subterráneas nº 4. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid. 168 pp. ([http://aguas.igme.es/igme/publica/depuracion\\_aresidual/\\*.pdf](http://aguas.igme.es/igme/publica/depuracion_aresidual/*.pdf), en 2008, donde \* corresponde a los números 1 a 9)
- Muñoz-Carpena, R.; Regalado, C.M.; Álvarez-Benedi, J.; Bartoli, F. (2002). Field evaluation of the new Philip-Dunne permeameter for measuring saturated hydraulic conductivity. *Soil Science*, 167(1), 9-24
- Reynolds, W.D.; Bowman, B.T.; Brunke, R.R.; Drury C.F.; Tan C.S. (2000). Comparison of tension infiltrometer, pressure infiltrometer, and soil core estimates of saturated hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64:478-484
- Scanlon, B.R.; Healy, R.W.; Cook, P.G. (2002). Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, 10:18-39
- Solís, C. (1990). *Los caminos del agua*. Mondadori. Madrid. 220 pp.
- Youngs, E.G. (1991). Infiltration measurements – A review. *Hydrological Processes*, 5, 309-320 ■
- Fecha de recepción del original: 30 abril 2008.*  
*Fecha de aceptación definitiva: 1 junio 2008.*